

국내외 주요 산불위험지수의 국내 적용성 평가: 태백산맥 동쪽 지역을 대상으로

마정혁* · 유철상**

*고려대학교 건축사회환경공학부

Evaluation of the Applicability of Major Domestic and International Forest fire indices: A Case Study in the Eastern Region of the Taebaek Mountain Range

Jeong-Hyeok Ma* · Chulsang Yoo**

**School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University*

(Received : 11 March 2024, Revised : 28 July 2024, Accepted : 28 July 2024)

요약

본 연구에서는 국내외 산불위험지수들의 국내 적용성에 대해 평가하였다. 이를 위해, 먼저, 전 세계적으로 많이 사용되는 산불위험지수들을 소개하고 그 계산 과정을 비교하였다. 이후 실제 국내 산불 발생 건수의 경년 변동 및 계절적 변동 경향을 각 산불위험지수의 적용 결과와 비교하였다. 마지막으로, 향후 국내에 적용 가능한 지수들을 선정하고 그 적용성을 높일 수 있는 보완 방향을 제시하였다. 고려한 산불위험지수는 미국에서 개발된 MI, KBDI, FFWI, mFFWI, 러시아에서 개발된 NI, ZHI, MNI, 그리고 국내에서 개발된 DWI 등이다. 본 연구의 대상지역으로 동해안 지역을 선정하였으며, 산불 발생 건수는 산림청에서 제공하는 산림통계연보를 참고하였다. 연구결과 대부분의 산불위험지수는 경년변동 정도가 크지 않아 실제 산불 발생 건수를 잘 나타내지는 못하는 것으로 나타났다. 그러나 대부분의 산불위험지수가 월 변동은 잘 나타내는 것으로 나타났다. 산불위험지수와 실제 산불 발생 건수의 상관분석 결과 최종적으로 동해안 지역에 적합한 지수로 mFFWI, MI, ZHI, DWI 등을 선정하였다. 그러나 이들 지수는 현재 상태로 국내 산불 발생을 적절히 나타낸다고 판단하기는 어려우며 추가의 보완이 필요한 것으로 판단되었다. 지수별로 보완되어야 할 부분도 각각 다르며, 따라서 이들에 대한 평가도 보완이 수행된 이후에야 가능할 것으로 보인다.

핵심용어 : 산불, 산불위험지수, 동해안 지역, 태백산맥

Abstract

In this study, we evaluate the applicability of domestic and international forest fire indices in Korea. To accomplish this objective, we first compare the structures of widely-used forest fire indices worldwide. Then, the application results of these forest fire indices are evaluated by comparing them with the annual and seasonal variations in actual forest fire occurrences in Korea. Finally, we select indices suitable for domestic application and propose directions to improve their appropriate applicabilities. The considered forest fire indices include MI, KBDI, FFWI, and mFFWI developed in the United States, NI, ZHI, and MNI developed in Russia, and DWI developed in Korea. This study considers the East Coast region as a study area, and the number of forest fire occurrences is referenced from the forestry statistics yearbook provided by the Korea Forest Service. As results, first, most forest fire indices do not adequately reproduce the actual annual forest fire occurrences as its variation is so small. However, most indices are found to effectively represent the monthly variations. Based on the correlation analysis between forest fire indices and actual forest fire occurrences, mFFWI, MI, ZHI, and DWI are selected as suitable indices for the East Coast region. However, these indices are still not satisfactory to adequately represent the forest fire occurrences in Korea, suggesting the need for further improvements. Each index has its own different aspects to be improved and, therefore, evaluation of these indices may be available only after further improvements are completed.

Key words : Forest fire, Forest fire index, East coast region, Taebaek mountain range

*All authors equally contributed

**To whom correspondence should be addressed.

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea
E-mail : envchul@korea.ac.kr

• Jeong-Hyeok Ma School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea / Master (2022020510@korea.ac.kr)
• Chulsang Yoo School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea/Professor (envchul@korea.ac.kr)

1. 서론

지구온난화로 인한 이상 기후로 전 세계적으로 산불 발생이 빈번히 발생하고 있다(NIFoS, 2013). 2019년 호주에서는 약 1,900만 ha의 면적이 산불에 의해 소실되었으며, 이로 인해 주변국들의 대기 오염 문제까지 발생하였다(NIFoS, 2020). 2020년에는 미국에서 대형 산불이 발생하여 약 331 ha의 면적이 소실되었으며, 3조원 이상의 피해금액이 추정되었다(GACC, 2020). 국내의 경우, 2017년에는 제주도에서 237 ha의 피해면적과 380억원의 피해금액이 산불로 인해 발생하였다(KFS, 2018). 2020년의 경우 강원도에는 1.741 ha의 피해면적과 610억원의 피해 금액이 발생하였으며, 경기도 화성, 경기도 평택, 충청남도 서산 등 국내 여러 지역에서 산불이 발생하였다(KFS, 2021).

산불 발생이 증가함에 따라, 산불과 관련된 연구가 다수 진행되고 있다(Field et al., 2004; Ruffault et al., 2018; Lee et al., 2022). 이러한 연구들에는 산불의 발생 위험을 나타내는 산불위험지수를 이용하는 경우가 많다(Van, 1987). 예를 들어, Niu and Zhai (2012)는 KBDI(Keetch-Byram Drought Index), FFDI(Forest Fire Danger Index), NI(Nesterov Index), MNI(Modified Nesterov Index)를 이용해 중국의 50년간 산불위험정도를 평가하였다. Ntinopoulos et al. (2022)는 캐나다에서 개발한 산불위험지수인 FWI(Fire Weather Index)를 이용해 그리스 준사막 지역의 산불 위험도에 대한 연구를 수행하였다. Choi et al. (2022)는 KBDI(Keetch-Byram Drought Index)를 이용해 SSP 시나리오에 따른 미래 충청지역의 산불위험정도를 평가하였다. 위와 같은 연구들을 통해 다양한 지역에 산불위험지수가 적용되어 산불 발생 위험 정도를 평가하고 있다.

그러나 산불위험지수는 지역적, 기후적인 특성을 반영하므로, 범용적으로 사용하기 어려운 측면이 있다. 이런 이유로 매우 다양한 산불위험지수가 개발되어 왔으며, 또한 다른 지역에 적용하기 위해 수정하거나 보완하는 경우도 많다(Wang et al., 2023). 예를 들어, Yang et al. (2015)는 캐나다에서 개발한 산불위험지수인 FWI를 뉴질랜드에 적용하기 위해 고려인자 중 하나인 가뭄 상황 코드(Drought Code)를 수정하고 평가하는 연구를 진행하였다. Taufik et al. (2015)는 습지 지역의 적용을 위해 수정 KBDI를 제시하기도 하였다.

본 연구에서는 현재 가용한 국내외 산불위험지수들의 국내 적용성에 대해 평가해보고자 한다. 전 세계적으로 많이 사용되는 산불위험지수들을 먼저 소개하고 그 계산 과정을 소개하고자 한다. 이를 통해 각 지수들의 특징을 판단할 수 있을 것이다. 이후 실제 국내 산불 발생 건수의 경년 변동 및 계절적 변동 경향을 산불위험지수의 그것과 비교해 보고자 한다. 이러한 비교는 기존의 지수들 중 국내 산불을 가장 잘 대변할 수 있는 것이 무엇인지를 판단하고 또한 그렇지 못한 경우에는 그 원인이 무엇인지를 파악할 수 있게 해 줄 것이다. 본 연구는 산불의 발생이 빈번한 태백산맥의 동해안 지역을 대상으로 수행하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1. 산불위험지수

산불위험지수는 산불 발생 가능성을 나타내는 대표적인 척도이다(Erikson and Johansson, 2020). 산불 발생에 영향을 미치는 기온, 토양수분, 습도, 강수량, 바람, 번개 발생 확률(probability of lightning), 대기의 안정성(atmospheric stability) 등의 인자들을 조합하여 산불위험지수를 산정한다. 이러한 산불위험지수는 국가별로 기후 특성에 알맞게 개발되어왔다. 공교롭게도 국토 면적이 넓은 미국, 러시아 등에서 개발한 위험지수가 상대적으로 많은 것으로 나타난다. 먼저, 미국의 경우 Munger Index (MI; Munger, 1916), Keetch-Byram Drought Index (KBDI; Keetch and Byram, 1968), Fosberg Fire Weather Index (FFWI; Fosberg, 1968), Modification Fosberg Fire Weather Index (mFFWI; Goodrick, 2002) 등의 지수가 사용되어 왔다. 러시아에서는 Nesterov Index (NI; Nesterov, 1949), Zhdanko Index (ZhI; Zhdanko, 1965), Modified Nesterov Index (MNI; Sherstyukov, 2002) 등의 지수를 개발하였다. 국내에서는 국립산림과학원에서 개발한 Daily Weather Index(DWI)가 있다 (Won et al., 2010; Won et al., 2016; Won et al., 2018). 이들 지수를 설명하며 다음과 같다.

(1) Munger Index(MI)

먼저, MI는 20세기 초 미국의 Oregon 주에서 개발된 지수이다(Munger, 1916). 간단히 무강우(또는 거의 무강우) 기간을 고려한다는 특징이 있다. MI는 다음 식을 통해 계산한다.

$$MI = w \times \frac{1}{2}w = \frac{1}{2}w^2 \quad (1)$$

여기서, w 는 0.05 inch (약 1.3 mm) 이하의 강수가 내린 기간(day)을 나타낸다. 이 지수는 계산이 간단하며 직관적이다. 즉, 산불의 위험은 연속된 거의 무강우인 날수의 제곱에 비례하여 급격히 커지는 구조를 나타낸다. 만일 30일 동안 위 조건에 해당하는 가뭄이 지속되었다면 MI는 지수적으로 증가하여 최종적으로 450이 된다. 그러나 일강우가 0.05 inch를 초과하게 되면 MI는 0으로 회귀한다. 특히, MI가 200을 초과하게 되면, 즉, 20일 동안 강우가 거의 없다면, 산불의 위험이 높은 것으로 판단한다(Heim Jr. 2002).

(2) Keetch-Byram Drought Index(KBDI)

KBDI는 Keetch and Byram (1968)이 산불 위험성을 판단하기 위해 제안한 지수이다. 이 지수는 일 최고온도와 강수량을 사용하여 건조의 정도를 0 - 800의 범위로 추정해 준다(Varol and Ertugrul, 2016). 토양수분의 상태와 연결하여 설명하기도 하는데, KBDI = 0이면 토양수분 부족이 전혀 없어 산불의 위험이 전혀 없음을 나타내고, 반대로 800

은 가장 심한 가뭄 상태로 산불의 위험이 최대로 치닫는 상황을 나타낸다. *KBDI*는 다음 식과 같이 계산된다.

$$Q = dQ + Q^{-1} - r \tag{2}$$

위 식에서 *Q*는 현재의 *KBDI*, *Q*⁻¹는 전날의 *KBDI*, *r*은 일 강수량(inch)을 의미한다. *dQ*는 현재의 기상 상황을 반영하는 *Q*의 변화량으로 다음과 같이 계산된다.

$$dQ = \frac{[800 - (Q^{-1} - r)] [0.968e^{(0.0486T)} - 8.30] dt}{1 + 10.88e^{(-0.0441R)}} \times 10^{-3} \tag{3}$$

여기서, *R*은 연 강수량(inch), *dt*는 시간 간격으로 주로 1일을 사용한다. *KBDI*는 그 범위에 따라 Table 1과 같은 산불 위험 정도를 나타낸다. 특히, *KBDI*가 500 이상일 경우 산불위험이 높은 것으로 판단한다.

(3) Forsberg Fire Weather Index (FFWI)

*FFWI*의 경우, 미국의 북동, 남서 지역에서 주로 사용되는 지수이다(Shaprpls et al., 2009). *FFWI*는 강수자료를 사용하지는 않지만 기온, 상대습도, 풍속을 이용해 다음과 같은 식으로 산정된다.

$$FFWI = \eta \sqrt{1 + U^2} / 0.3002 \tag{4}$$

여기서, η 는 수분 감쇠상수(moisture damping coefficient), *U*는 풍속이다. η 는 다음 식을 통해 계산할 수 있다.

$$\eta = 1 - 2\left(\frac{m}{30}\right) + 1.5\left(\frac{m}{30}\right)^2 - 0.5\left(\frac{m}{30}\right)^3 \tag{5}$$

위 식에서 *m*은 수분 평형상수(equilibrium moisture content)이며, 상대습도(*H*)와 평균기온(*T*)을 이용하여 다음과 같이 산정한다.

$$m = \begin{cases} 0.032289 + 0.281073H - 0.000578HT, & H \leq 10\% \\ 2.22749 + 0.160107H - 0.01478T, & 10\% < H \leq 50\% \\ 21.0606 + 0.005565H^2 - 0.483199H, & H > 50\% \end{cases} \tag{6}$$

Table 1. Classification of fire risk levels according to the *KBDI* range

<i>KBDI</i>	Description	Degree of fire risk
0 ~ 150	Upper soil and surface completely wet condition	No probability
150 ~ 300	Upper soil and surface moist condition	Low probability
300 ~ 500	Upper soil and surface dry condition	Moderate probability
500 ~ 700	Upper soil and surface very dry condition	High probability
700 ~ 800	Upper soil and surface extremely dry condition	Very high probability

*FFWI*의 범위는 0 ~ 100 사이로 나타난다(Zigner et al., 2022). 지수의 수치가 클수록 산불 발생 위험 정도가 높아지며, 수치가 낮아질수록 산불 발생 위험 정도가 낮아진다. 특히, *FFWI* 범위가 50 이상일 경우 산불위험도가 큰 것으로 판단한다.

(4) Modification Forsberg Fire Weather Index (mFFWI)

Goodrick(2002)은 *FFWI*에 연료가용요소(fuel availability factor, *FAF*)를 추가한 *mFFWI*를 제안하였다. 연료가용 요소는 앞서 언급한 *KBDI*를 이용하여 다음과 같이 정량화 하였다.

$$FAF = 0.000002K^2 + 0.72 \tag{7}$$

여기서, *K*는 *KBDI*를 나타낸다. 이렇게 계산한 연료가용 요소에 *FFWI*를 곱하면 *mFFWI*를 구할 수 있다. 즉, *mFFWI*는 다음 식과 같이 나타낸다.

$$mFFWI = FAF \cdot FFWI \tag{8}$$

연료가용요소는 대략 0 ~ 2의 범위를 갖는다. 따라서 *mFFWI*의 범위는 0 ~ 200 정도가 된다. *mFFWI*가 100 이상일 경우 산불의 위험이 매우 큰 것으로 판단한다.

(5) Nesterov Index (NI)

*NI*는 1949년 구소련에서 개발된 산불위험지수이다(Nesterov, 1949). *NI*는 기온, 강우일수, 이슬점 온도를 이용해 산불의 위험 정도를 평가하며, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$NI = \sum_{i=1}^w T_i (T_i - T_{di}) \tag{9}$$

여기서, *w*는 3 mm 이상의 강우가 내리지 않는 날의 수, *T_i*는 당일 정오의 온도, *T_{di}*는 당일 이슬점 온도를 의미한다. *NI*는 일 강우량이 3 mm를 초과하면 해당 일의 지수는 0으로 재설정한다. *NI* 값이 300 미만일 경우에는 산불 위험 정도가 낮은 것으로, 4,000 이상이면 높은 것으로 판단한다. 10,000을 초과할 경우 산불위험 정도가 매우 높음을 나타낸다.

(6) Zhdanko Index (Zhi)

Zhdanko (1965)가 제시한 *Zhi*는 그 개념상 *NI*와 유사하다. *Zhi*는 다음과 같이 계산된다.

$$Zhi = [Zhi_{i-1} + d] \times K(i) \tag{10}$$

위 식에서 *T*는 일중 최고기온으로 통상 낮 12시의 기온을 사용한다. *d*는 이슬점 격차(dew-point deficit)로 일 최고기온과 이슬점온도(*T_{di}*)와의 차이로 계산된다. 즉,

$d = T - T_{di}$ 이다. 이러한 이슬점 격차는 대기 중의 습도를 추정하는 역할을 한다. 따라서 해당 인자의 수치가 증가한다면 대기가 상대적으로 건조한 것을 의미하며, 이는 산불 위험의 증가로 이어지게 된다. $K(i)$ 는 현재($t = i$)의 강수량을 반영하여 결정되는 규모계수(scale coefficient)이다. 무강우인 경우 $K=1$ 이며, 강우량이 20 mm를 초과하면 $K=0$ 이다. K 는 이 두 값 사이에서 점진적으로 변한다. 강수량 1, 3, 6, 15, 20까지의 구간을 설정하고 K 값이 각각 0.2씩 감소하도록 설정되어 있다. 예를 들어, 강수량이 3 ~ 6 mm 정도가 되면 K 값은 0.4의 값을 갖는다. 결과적으로, NI 와 ZhI 의 차이는 강수량에 따른 급격한 변화나 부드러운 변화나에 있다. ZhI 가 부드럽게 변하는 지수이다. NI 는 위 식에서 현재 토양수분 상태와 관계없이 강수량이 3 mm 이상인 경우 $K=0$ 을 가정하고 있는 것이다. 이러한 ZhI 는 별도의 범위가 지정되어 있지 않다.

(7) Modified Nesterov Index (MNI)

MNI 는 NI 를 기반으로 하는 산불위험지수로 앞서 설명한 ZhI 의 특징과 유사하다(Groisman et al., 2007). MNI 는 기존 NI 에 ZhI 에서 사용되는 규모계수 $K(i)$ 를 반영하여 나타낸다. 이러한 MNI 는 산불위험을 총 5단계로 구분한다. 산불위험없음 1,000미만, 낮은 위험 1,001 ~ 2,500, 중간위험 2,501 ~ 5,000, 높은 위험 5,001 ~ 10,000, 매우 높은 위험 10,000 초과이다(Hamadeh et al., 2017). MNI 는 다음 식으로 계산된다.

$$MNI = \sum_{i=1}^w T_i (T_i - T_{di}) K(i) \quad (11)$$

(8) Daily Weather Index (DWI)

DWI 는 국내에서 개발된 산불위험 지수로 지역별 산불 발생 건수 및 산불 발생 시의 기상 상태 자료를 분석하여 개발되었다. 먼저, 산불 발생 확률모형을 각 지역의 자료를 이용하여 로지스틱 회귀분석을 통해 결정한 후, 그 발생확률의 범위를 고려하여 총 10단계로 DWI 를 결정하는 방식이다. 본 연구에서는 Won et al. (2010)에서 제안된 강원특별자치도(P_{GW})와 경상북도(P_{GB})의 산불발생 확률모형을 이용하였다. 즉,

$$P_{GW} = [1 + \left\{ \frac{\exp(2.494 + (0.004 \times T_{max}))}{-(0.008 \times EF)} \right\}^{-1}]^{-1} \quad (12)$$

$$P_{GB} = [1 + \left\{ \frac{\exp(5.396 + (0.004 \times T_{max}))}{-(0.014 \times EF) + (0.027 \times W_{mean})} \right\}^{-1}]^{-1} \quad (13)$$

여기서, T_{max} 는 최고기온, EF 는 실효습도이다. 즉, P_{GW} 와 P_{GB} 는 최고기온과 실효습도만으로 계산하는 구조이다. 이중 실효습도는 상대습도를 사용하여 건조도를 나타내는 것으로 다음과 같이 표현된다.

Table 2. Determination of $P_{GW}P_{GB}$ according to the range of DWI

$P_{GW}P_{GB}$	DWI	Ratio Interval
0.0000 ~ 0.0406	1	10%
0.0407 ~ 0.0818	2	20%
0.0819 ~ 0.1307	3	30%
0.1308 ~ 0.1917	4	40%
0.1918 ~ 0.2648	5	50%
0.2649 ~ 0.3615	6	60%
0.3616 ~ 0.4711	7	70%
0.4712 ~ 0.6004	8	80%
0.6005 ~ 0.7562	9	90%
0.7563 ~ 1.0000	10	100%

$$EF = (1 - r) \times [H^{0d} + rH^{1d} + r^2H^{2d} + r^3H^{3d} + r^4H^{4d}] \quad (14)$$

여기서, H^{id} 는 현재를 기준으로 i 일 이전의 상대습도를 나타낸다. r 은 실효습도 계수로 0.7을 사용한다. 식 (12), 식 (13)으로 계산되는 확률을 다음 Table 2에 적용하면 그에 해당하는 DWI 를 결정할 수 있다. DWI 는 1 ~ 10의 범위를 가지며, DWI 가 1이면 산불 발생확률은 10 %가 된다.

3. 대상지역 및 자료

3.1 동해안 지역

본 연구의 대상지는 국내에서 산불 발생이 가장 빈번한 태백산맥 동해안 지역으로 선정하였다(Lim, 2000; Lee and Kim, 2011). 동해안 지역은 강원특별자치도, 경상북도, 경상남도로 이루어져 있으며, 본 연구에서는 동해안 대부분을 차지하고 있는 강원특별자치도와 경상북도를 동해안 지역으로 선정하여 연구를 수행하였다. 강원특별자치도와 경상북도는 국내 최장 산맥인 태백산맥을 포함하고 있으며, 이에, 산림의 비율이 높게 나타난다(KFS, 2016). 동해안 지역의 면적은 강원특별자치도 16,875 km², 경상북도 19,030 km²로 전체국토의 약 35.8% 정도를 차지하고 있다. Fig. 1에는 국내 DEM에 대상지의 형상(붉은 실선) 및 태백산맥 일대(노란 점선)를 표시하였으며, 동해안 일대에 위치한 기상관측소(초록 원)도 표시하였다.

3.2 기상 자료

본 연구에 사용된 기상자료는 강릉(GN), 경주(GJ), 대관령(DGR), 동해(DH), 북강릉(NGN), 속초(SC), 영덕(YD), 울진(UJ), 태백(TB), 포항(PH) 등 총 10개 지점의 일단위 강수량, 최고기온, 평균기온, 평균풍속, 상대습도 자료이다. 해당 자료들은 모두 기상청 기상자료개방포털(<http://www.climate.go.kr>)에서 획득하였으며, 사용된 기간은 2012 ~ 2021년이다. 사용된 자료들의 시계열을 Fig. 2에 나타내었다.

위 그림을 통해 과거 10년(2012~2021년) 동해안 지역의 기상 특징을 살펴볼 수 있다. 대관령 지점을 예시로 보면, 강수량의 경우 증가와 감소의 패턴이 일정하게 반복되는 것을 알 수 있다. 다우해와 과우해가 반복되는 패턴이 과거 10년 동안 나타났으며, 최근에 가까워질수록 강수량의 편차는 점점 커지는 것으로 나타났다. 이러한 특징은 타 지점들에서도 유사하게 나타났다. 최고기온의 경우 대관령 지점은 10°C ~ 15°C로 타 지점들이 대체로 15°C ~ 20°C 사이로 나타난 것에 비해 낮게 나타났다. 평균기온에서도 유사하게 나타나며, 대관령 지점의 기온이 타 지점에 비해 낮은 것을 알 수 있다. 반대로 상대습도, 풍속은 대관령 지점에서 대체로 높게 나타난다.

3.3 산불 발생 건수 및 피해면적

본 연구에서는 산림청 산불통계연보의 국내 산불 발생 건수 자료를 사용하였다(KFS, 2013; KFS, 2014; KFS, 2015; KFS, 2016; KFS, 2017; KFS, 2018; KFS, 2019; KFS, 2020; KFS, 2021; KFS, 2022). 산불 통계 연보에는 전국을 대상으로 한 월별, 연도별 산불 발생 건수가 정리되어 있으며, 월별, 연도별 산불 피해면적, 산불 진화 현황, 사상자 현황, 피해 금액, 산불 발생 원인 등이 기재되어 있다. 본 연구에서는 동해안 지역(강원특별자치도, 경상북도)

의 산불 현황을 비교하고자 한다. 고려한 기간은 2012 ~ 2021년이다.

Fig. 3은 연도별 동해안 지역의 산불 발생 건수를 시계열로 나타낸 그림이다. 그림을 보면 2012년부터 2015년까지 산불 발생 건수가 지속적으로 증가한 것을 알 수 있다. 2012년에는 44회였던 산불 발생 건수가 2013년 76회, 2014년 141회, 2015년 176회로 순차적으로 증가하였다. 이후 2019년까지 120회~190회 사이로 산불 발생 건수의 증감이 반복되었으며, 2020년 150회, 2021년 88회로 감소하는 추세가 나타났다.

위 결과를 월별로 구분하여 산불 발생 건수 및 피해면적을 살펴보면 Fig. 4와 같다. 우선, 월별 산불 발생 건수는 3월에 제일 큰 것으로 나타난다. 3월 전후인 2월, 4월의 산불 발생 횟수도 크고, 그 다음에는 5월이 크게 나타난다. 여름철 우기의 산불 발생 횟수는 매우 적으며, 다시 가을을 지나 겨울에 접어들며 산불 발생 횟수도 증가한다. 월별 산불 피해 면적의 경우는 대체로 산불 발생 건수와 비례하는 경향을 보인다. 4월에 가장 큰 값을 보이며, 다음으로 5월, 2월의 순으로 넓게 나타난다. 산불 발생 횟수가 3월이 제일 많음에도 피해면적이 4월에 더 큰 이유를 정확히 설명하기는 어려우나, 동해안의 산악지대에 3월까지도 남아 있는 눈의 영향이 아닐까 추측된다.

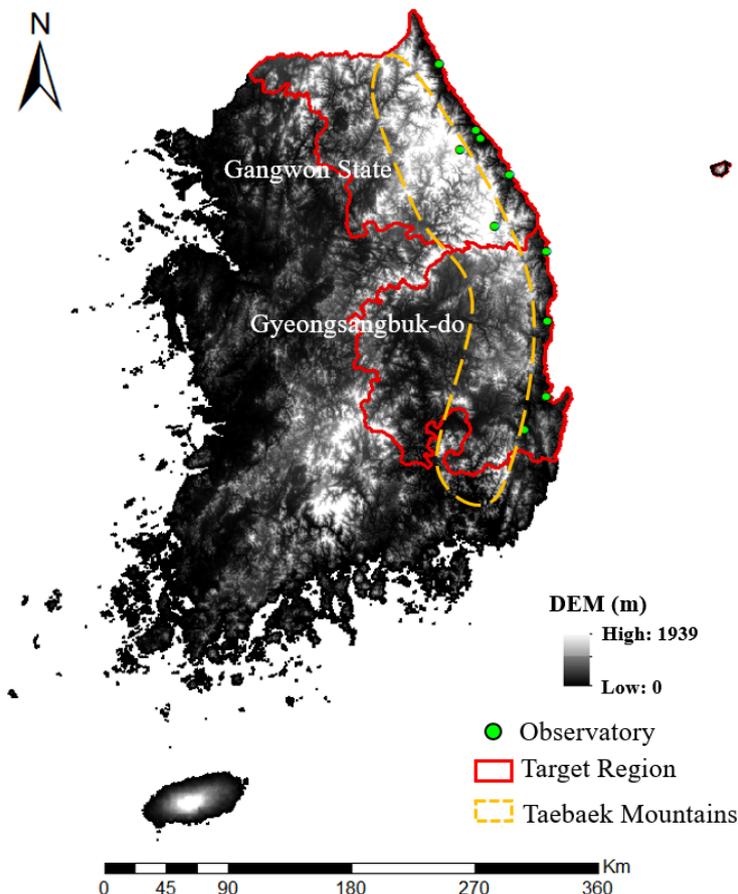
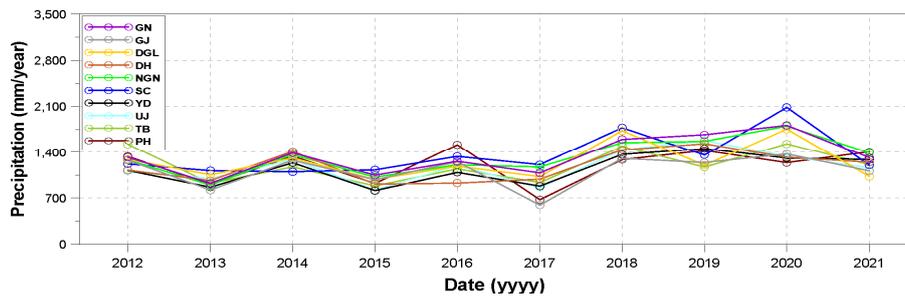
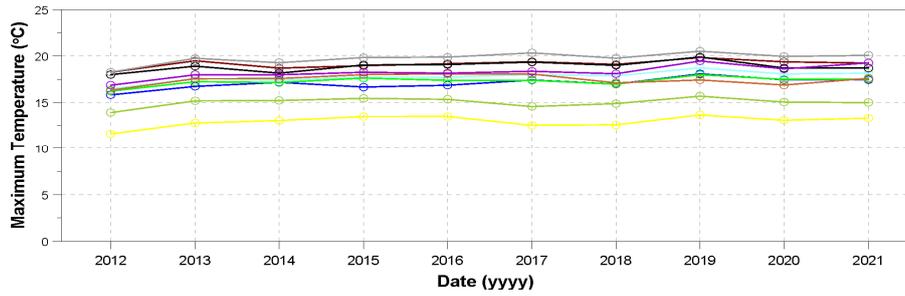


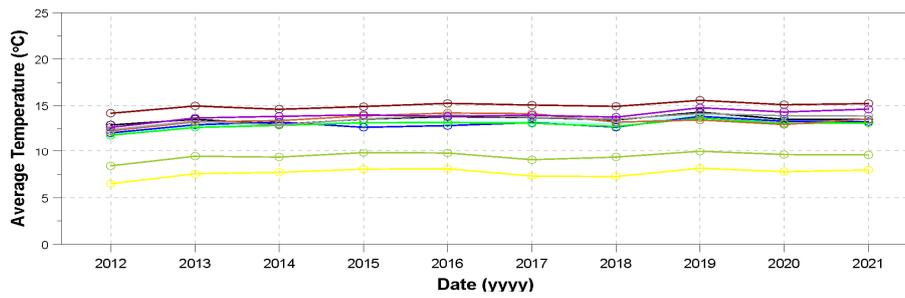
Fig. 1. Topographic features, altitude, and locations of nearby weather observation stations



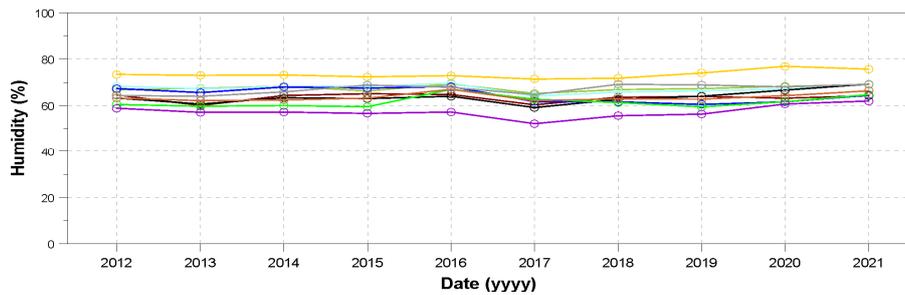
(a) Precipitation



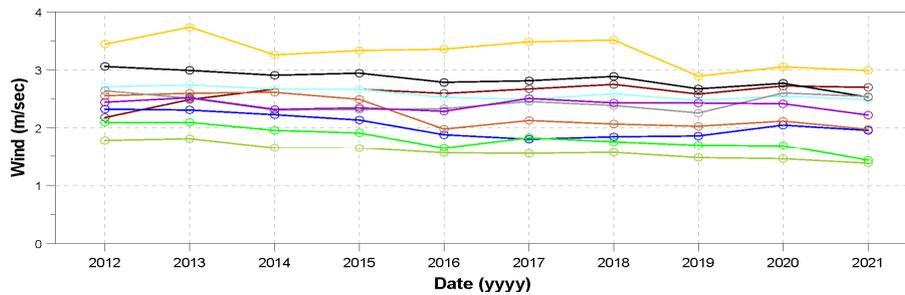
(b) Maximum Temperature(average)



(c) Average Temperature(average)



(d) Humidity(average)



(e) Wind(average)

Fig. 2. Yearly time series of meteorological data used for each location (2012 to 2021)

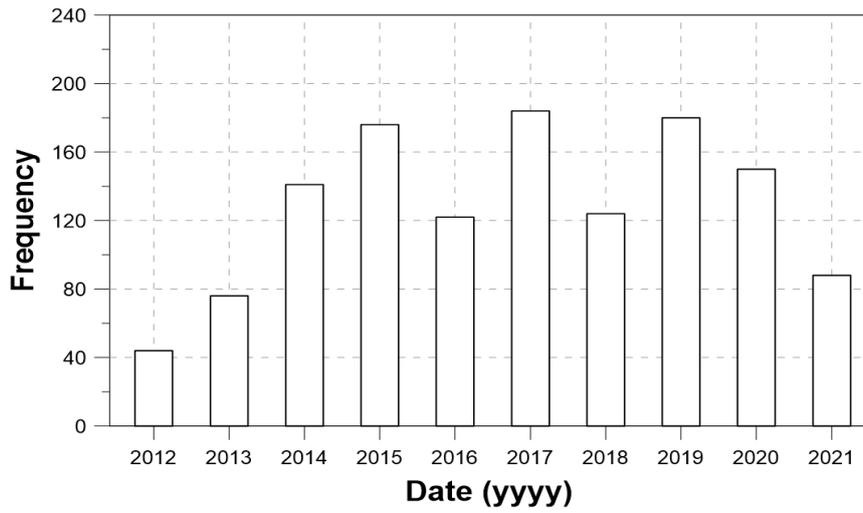


Fig. 3. Number of forest fires in the East Coast region by year during the target period

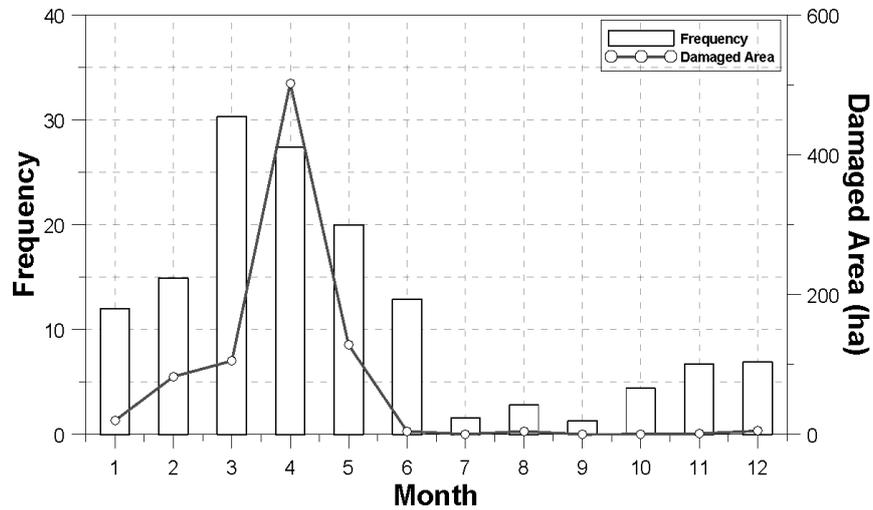


Fig. 4. Monthly frequency and area affected by forest fires in the East Coast regions(average from 2012 to 2021)

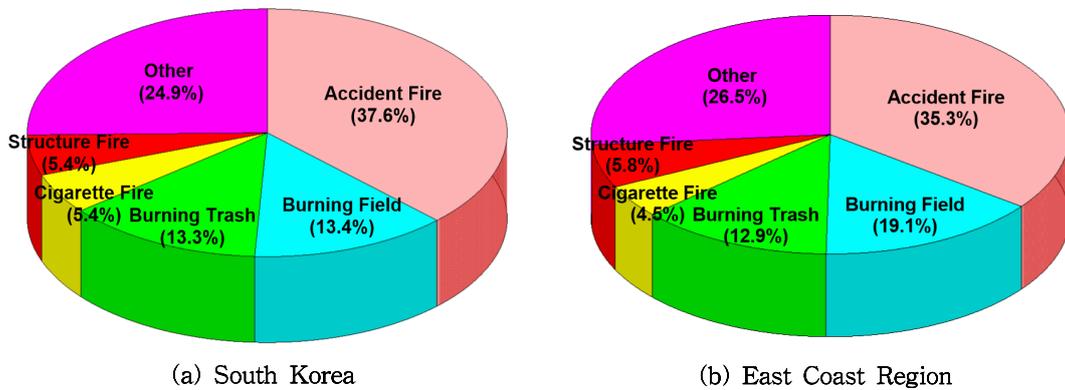


Fig. 5. Comparison of monthly causes of forest fires in domestic and East Coast regions(average 2012 to 2021)

산불 원인은 국내 전체와 동해안 지역이 유사한 것으로 나타났다(Fig. 5). 우선, 국내의 주 산불발생 요인은 실화(accident fire)로 나타났다. 실화는 1,797건으로 약 37.3%를 차지하는 것으로 나타났다. 다음, 기타(other) 642건(24.9%), 밭 소각(burning field) 637건(13.4%), 쓰레기 소각(burning trash) 637건(13.3%), 담뱃불(cigarette fire) 258건(5.4%), 건축물 화재(structure fire) 257건(5.4%)으로 나타났다. 동해안 지역에서도 가장 높은 산불 발생 요인은 실화로 나타났다. 실화는 454건으로 약 35.3%로 나타났다. 다음, 기타 341건(26.5%), 밭 소각 191건(19.1%), 쓰레기 소각 166건(12.9%), 건축물 화재 75건(5.8%) 담뱃불 58건(4.5%)으로 나타났다. 위와 같이 국내 전체나 동해안 지역에서 산불의 발생 원인에 큰 차이는 없는 것으로 나타난다. 밭 소각으로 인한 화재가 약간 더 많은 정도이다. 또한, 전국이나 동해안 모두 자연적으로 발생한 산불을 구체적으로 특정하기 어려운 문제점도 있다. 이에 본 연구에서는 대상지역에서 발생한 산불 전체를 그대로 반영하여 연구를 수행하였다.

4. 산불위험지수의 적용성 평가

4.1 산불위험지수의 계산

본 연구에서는 미국에서 사용하는 MI, KBDI, FFWI, mFFWI, 러시아에서 사용하는 NI, Zhi, MNI 및 국내에서 사용되는 DWI를 사용하여 산불의 위험도 변화를 평가하였다. 사용된 위험지수들의 범위는 모두 다르지만 본 연구에서는 이들 위험지수의 최댓값을 100으로 맞추어 상대 비교가 가능하도록 하였다. 즉, 각 위험지수를 최댓값으로 나누고 100을 곱하는 형식으로 표준화를 수행한 것이다. 이들 산불위험지수의 계산은 총 10개 지점에 대해 일 단위로 수행하였으며, 이를 평균하여 동해안 지역의 산불 위험도로 나타내었다. 그 결과는 다음 Fig. 6과 같다.

그림에서 살펴볼 수 있는 특징으로 먼저 위험지수의 계절성이 있다. 대체로 1년 주기로 지수의 등락이 반복되는 특성을 보인다. MI, FFWI, mFFWI, NI, Zhi, MNI, DWI의 경우 대체로 가을을 기점으로 상승하여 겨울철 ~ 봄철에 최고점에 이르고, 이후 감소하여 여름이 되면 최소가 되는 추세가 반복되고 있다. 그러나 예외적으로 KBDI의 경우에는 다른 위험지수들과는 달리 늦봄 ~ 여름에 대체로 높게 나타나며, 겨울은 감소하는 형태로 나타난다. 이는 아래 Fig. 7에서 자세히 확인할 수 있다.

Fig. 7은 2021년을 예시로 각 위험지수들의 일단위 시계열을 나타낸 그림이다. 그림을 보면 KBDI의 경우, 타 지수들과는 달리 여름에 지수의 수치가 가파르게 상승한 것을 확인할 수 있다. 특히, 해당년도에는 모든 계절 통틀어 여름에 지수의 수치가 가장 높게 나타난 것을 알 수 있다. 이와 같은 추세가 나타난 이유는 KBDI는 기온의 영향을 크게 받기 때문이다. 기온을 반영하는 타 지수들의 경우, 기

온뿐만 아니라 상대습도 및 이슬점 온도 등을 이용해 습도(건조도)를 평가한다. 이러한 이유로 기온에만 의존하여 평가하지 않기에 어느정도 유사한 계절성을 나타내고 있다. 그러나 KBDI는 기온에만 의존하여 건조도를 평가하기에 타 지수들과는 다소 다른 추세의 계절성이 나타난다. 즉, 기온이 높으면 산불 발생확률이 높고, 기온이 낮으면 산불 발생 확률이 낮은 형태로 추세가 형성된다. 결과적으로 KBDI는 국내 산불위험 정도를 나타내기에 부적절한 지수로 판단되어 추후의 비교에서 제외하였다.

Fig. 6에서 살펴볼 수 있는 또 다른 내용 중의 하나는 산불위험지수가 최근으로 올수록 커지고 있다는 점이다. 예를 들어, MI의 경우 그 수치가 가장 크게 나타난 시기는 2020년도 겨울이다. 이전 기간에 비해 최소 1.1배에서 최대 20배 정도의 큰 값을 보이고 있다. Zhi의 경우에는 2021년, NI의 경우 2019년에 최대의 수치를 기록하고 있다. 이와는 반대로 FFWI와 mFFWI는 2016년에 최댓값을 보이고 있으며, MNI는 2015년, DWI는 2018년 봄에 최댓값을 기록하고 있다. 이상과 같이 이들 위험지수들이 최근에 상당히 큰 값을 보이고 있음에도 불구하고, 그 시점이 일치하고 있지는 않다. 이는 기본적으로 각 위험지수에서 반영하는 기상 인자의 특성이 다르기 때문이다. 이들 위험지수 모두 토양의 건조도를 간접적으로 판단하는 형식으로 개발되었다고 하고 있으나 그 방법이 상당히 다를 수 있다.

4.2 산불위험지수와 산불 발생 건수 및 산불 피해 면적 비교 평가

Fig. 8은 동해안 지역의 연도별 총 산불 발생 건수와 산출된 산불위험지수를 연 평균으로 나타낸 그림이다. 그림을 보면 2015년도까지 산불 발생이 증가하다가 이후 증감을 반복하는 것을 알 수 있다. 과거기간 중 2017년에 총 184회로 산불 발생이 가장 많이 발생하였으며, 2012년에 44회로 산불 발생이 가장 적게 나타났다. 산불위험지수의 경우 지수별로 큰 변동이 없는 것으로 나타난다. 대체로 모든 지수들이 20 이하에서 추세가 나타나며, 지수별 편차도 크지 않은 것으로 나타났다. 즉, 산불 발생 건수 추세에 비해 연도별 산불위험지수의 변화는 그리 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 9는 산불위험지수와 동해안 지역의 산불 발생 건수를 월 평균으로 나타낸 그림이다. 지수별 산불 발생 건수와 추세를 비교해보면, 모든 지수들이 대체로 산불 발생 건수와 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 우선, 국내의 경우 산불 발생 건수 자료를 통해 알 수 있듯이 가을(9 ~ 11월)을 기점으로 산불 발생 건수가 점차 증가하여 봄에 가장 많은 산불이 발생하는 것을 알 수 있다. 이후, 여름에 산불 발생이 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 8을 보면 대부분의 산불위험지수에서 가을을 기준으로 산불 위험 정도가 증가하며, 여름을 기준으로 산불 위험 정도가 감소하는 것을 알 수 있다. 실제로 국내의 경우, 여름은 습한 기후로 인해 산불 발생이 감소하며, 이러한 특징이 적절히 반영되어 나타난 것을 알 수 있다.

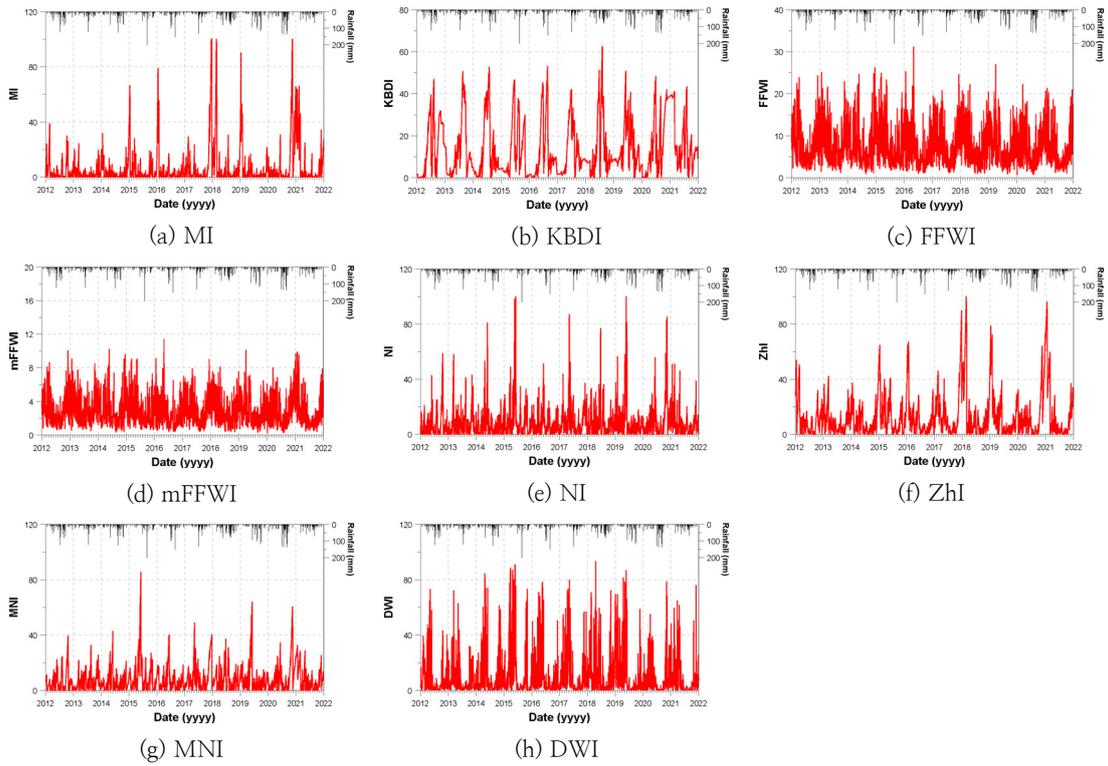


Fig. 6. Calculation results of forest fire index in the East Coast region between 2012 and 2021

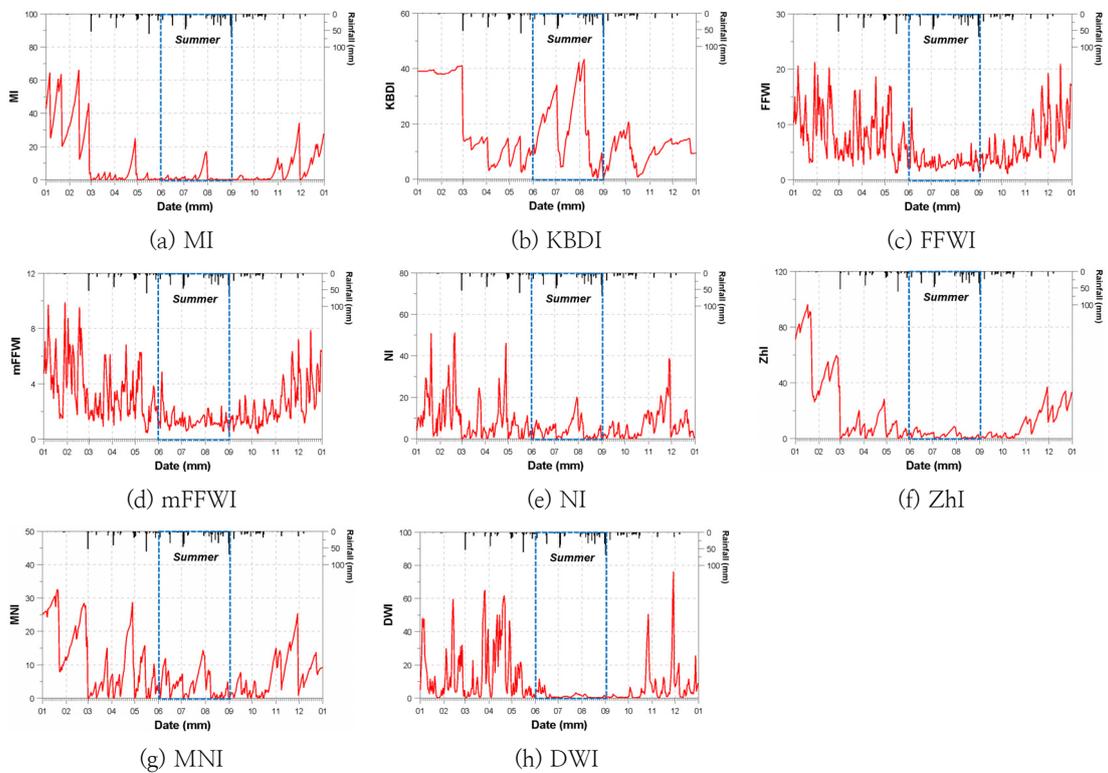


Fig. 7. Changes in forest fire risk of forest fire index in 2021

그러나 모든 산불위험지수가 국내 산불 발생 특징을 유사하게 나타내고 있는 것만은 아니다. 실제 산불 발생에 비해 본 연구에서 사용된, 특히 국외에서 개발된 산불위험지수는 겨울철 산불 위험 정도를 높게 나타내고 있다. 겨울철 산불 위험지수와 산불 발생 건수를 비교하면 이러한 특징을 명확히 확인할 수 있다. 국내에서는 겨울철 산불 발생도 빈번하게 발생하지만 가장 많이 발생하는 것은 아니다. 그러나 대부분의 국외 산불위험지수에서 겨울철을 산불 발생 위험이 가장 높은 계절로 나타내고 있다. 즉, 국외에서 개발된 산불위험지수는 겨울철 산불 위험을 과도하게 크게 나타내고 있음을 알 수 있다. 이에 반해 국내에서 개발된 DWI는 그나마 봄철의 산불 위험을 크게 나타내고 있다. 그러나 DWI 역시 3월에 가장 많은 산불 발생을 설명하지는 못한다. 오히려 5월의 산불위험을 가장 크게 제시하고 있다. 이러한 문제는 자연적인 산불 원인만을 한정하지 않고 인위

적인 산불 원인을 함께 고려한 탓도 있을 것이다. 실제 산불 위험을 보다 잘 표현할 수 있는 지수의 선별은 이에 대한 구체적인 분석을 통해 가능할 것이다.

이상과 같이 나타난 각 산불위험지수와 산불발생 빈도 사이의 관계를 상관계수로 정량화 해 보았다. 상관계수는 연도별 및 월별 자료를 이용하여 추정하였다(Table 3). 우선, 먼저, 연도별 상관계수를 보면 NI의 상관계수가 가장 높은 것으로 나타났다. 상관계수 값은 0.79로 연도별 산불 발생 추세를 잘 따라가는 것으로 보인다. MNI와 DWI도 각 0.71, 0.70으로 높은 상관을 보였다. 그러나 월별 자료의 분석에서는 DWI의 상관계수가 0.86으로 타 지수에 비해 월등히 높게 나타났다. FFWI, mFFWI가 0.6, 0.57 정도로 나쁘지 않은 상관을 보였으나 DWI에 비하면 낮은 편이다. 연도별 평가에서 높은 상관을 기록한 NI, MNI가 0.35, 0.22의 낮은 상관을 보이는 것도 의외의 결과이다.

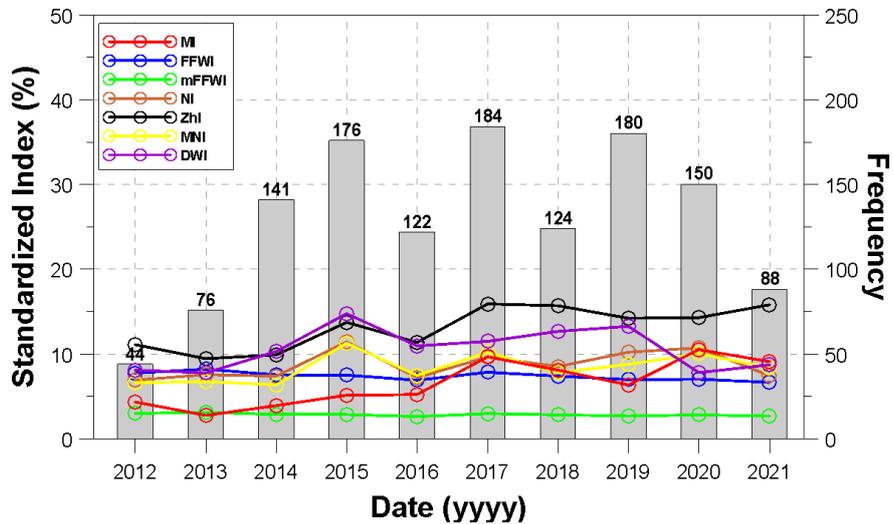


Fig. 8. Comparison of yearly forest fire index(average from 2012 to 2021) and number of forest fire occurrences(cumulative from 2012 to 2021)

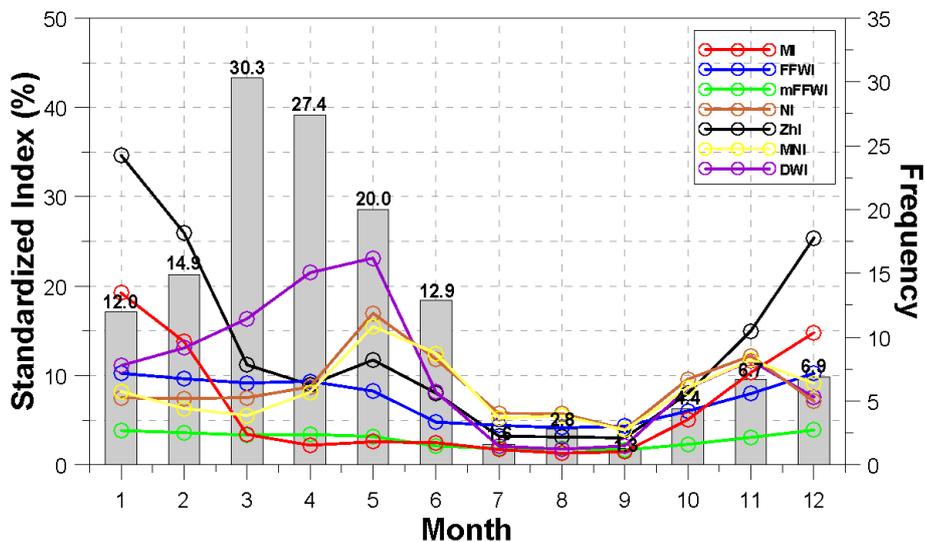


Fig. 9. Comparison of monthly forest fire index(average from 2012 to 2021) and number of forest fire occurrences(cumulative from 2012 to 2021)

Table 3. Yearly and monthly average correlation coefficients

Forest Fire Index	Yearly Correlation	Forest Fire Index	Monthly Correlation
MI	0.38	MI	-0.05
FFWI	-0.18	FFWI	0.60
mFFWI	-0.29	mFFWI	0.57
NI	0.79	NI	0.35
ZhI	0.45	ZhI	0.17
MNI	0.71	MNI	0.22
DWI	0.70	DWI	0.86

추가로, 본 연구에서는 봄철(3, 4, 5월)의 산불로 한정하여 총 10개의 기상관측 지점과 그 지점이 대표하는 지역의 산불발생 빈도자료를 상관분석하였다. 이는 유사한 지역이기는 하지만 봄철로 한정할 경우 다른 특성을 보이는지 또는 지점별로 다른 적용성이 있는지를 판단해 보고자 함이다. 동해, 속초, 태백 지점은 최근 10년 동안 3월 ~ 5월의 산불 발생 건수가 적어 분석에서 제외하였다. 상관분석의 결과는 Table 4에 정리하였다.

Table 4는 먼저 지점 별로 상관계수가 매우 상이하게 나타난다는 것을 보여준다. 우선, 강원특별자치도에 위치한 강릉, 대관령, 북강릉 지점을 보면 MI, ZhI, MNI, DWI의 상관성이 높은 것으로 나타났다. MI, ZhI의 경우 강릉, 북강릉 지점에서 상관성이 높게 나타났으며, MNI, DWI의 경우 대관령 지점에서 상관성이 높게 나타났다, 이상하게도 DWI의 경우 대관령 지점에서의 상관계수는 0.99로 완벽한 수준이나, 공교롭게도 다른 지역에서의 상관은 매우 떨어진다. 경상북도에 위치한 경주, 영덕, 울진, 포항 지점에서는 주로 FFWI, mFFWI의 상관성이 높게 나타났다. 두 지수는 영덕을 제외한 모든 지점에서 0.6 이상의 상관을 보여 오히려 산불 발생 추세를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 이 외에도 MI, ZhI의 경우 경주 지점에서 높은 상관성을 보여주었으며, NI, MNI의 경우 영덕 지점에서 상관성이 높은 것을 알 수 있다.

이상과 같이 지점별로 좋은 상관을 보이는 산불위험지수가 크게 다르게 나타난다. 즉, 동해안 지역의 봄철 산불위험에 대해서 mFFWI, MI, ZhI가 전반적으로 적절하게 추세를 나타내며, 이외에 FFWI, MNI, NI도 특정 지점에 대

Table 5. Yearly and monthly average correlation coefficients based on damaged area

Forest Fire Index	Yearly Correlation	Forest Fire Index	Monthly Correlation
MI	0.56	MI	-0.22
FFWI	-0.38	FFWI	0.39
mFFWI	-0.33	mFFWI	0.35
NI	0.63	NI	0.15
ZhI	0.51	ZhI	-0.07
MNI	0.46	MNI	0.06
DWI	0.20	DWI	0.70

해서는 적절한 결과를 나타내는 것으로 판단된다. 그러나 대관령 지역에서 완벽한 성능을 보인 DWI가 공교롭게도 나머지 지점에서는 매우 낮은 상관성을 보이는 것이 흥미롭다. 이 결과는 앞서 전체 지역을 대상으로 수행한 결과와 배치된다. 결과적으로 동해안 전 지역에 공통적으로 적용하기에는 본 연구에서 고려한 모든 지수가 한계를 갖는다는 점은 명확하다.

추가로, 본 연구에서는 산불로 인한 피해 면적과 산불위험지수의 상관평가도 수행하였다. 우선, 산불 피해 면적에 따른 연도별 및 월별 상관계수를 표 5에 정리하였다. 연도별 상관계수를 보면 NI의 상관계수가 0.63으로 가장 높게 나타난 것을 알 수 있다. 이외에 MI, ZhI도 유의미한 상관성이 나타난 것을 확인할 수 있다. 월별 상관계수의 경우, DWI가 0.7로 가장 높은 상관성이 나타났다. 나머지 지수들의 경우, 상관계수는 0.5 미만으로 상관성이 다소 낮은 것을 확인할 수 있다. 대체로 앞선 산불 발생 빈도 비교 결과에 비해 산불위험지수들의 상관성이 낮게 나타났다.

다음은 각 기상관측지점에서의 산불위험지수와 해당 지점의 대표 지역의 산불 피해 면적에 대한 상관분석을 수행하였다. 이때, 기간은 봄철로 한정하여 비교 분석을 수행하였으며, 이에 대한 내용은 Table 6에 정리하였다.

Table 6을 보면, 대체로 모든 지점들에 대해 상관성이 낮게 나타난 것을 알 수 있다. 우선, 강원특별자치도의 각 지점들을 보면, 강릉 지점의 경우, 모든 산불위험지수들의 상관성이 0.5 미만으로 나타난 것을 알 수 있다. FFWI가 가장 높은 상관성을 띄고 있으나, 0.38로 상관계수가 매우 낮

Table 4. Correlation coefficients for each location during the spring season

Region		Spring Season Forest Fire Index Correlation						
		MI	FFWI	mFFWI	NI	ZhI	MNI	DWI
Gangwon -State	GN	0.76	-0.31	0.33	0.30	0.64	0.21	-0.38
	DGR	-0.99	0.25	0.66	0.73	0.05	0.79	0.99
	NGN	0.86	-0.79	-0.95	0.28	0.77	0.18	-0.39
Gyeong sang buk-do	GJ	0.91	0.82	0.76	-0.98	0.66	-0.99	-0.94
	YD	0.20	-0.97	-0.96	0.96	0.21	0.77	0.42
	UJ	-0.99	0.65	0.64	-0.65	-0.98	-0.53	0.08
	PH	0.31	0.79	0.91	-0.32	-0.90	-0.13	0.37

Table 6. Correlation coefficients for each location during the spring season based on damaged area

Region		Spring Season Forest Fire Index Correlation						
		MI	FFWI	mFFWI	NI	ZhI	MNI	DWI
Gangwon -State	GN	-0.70	0.38	-0.40	-0.38	-0.70	-0.29	0.31
	DGR	0.97	-0.03	-0.48	-0.90	-0.26	-0.91	-0.98
	NGN	-0.81	0.84	0.93	-0.35	-0.82	-0.26	0.32
Gyeong sang buk-do	GJ	0.70	0.55	0.48	-0.85	0.89	-0.88	-0.99
	YD	-0.04	-0.99	-0.99	0.99	-0.02	0.90	0.62
	UJ	-0.94	0.27	0.26	-0.27	-0.98	-0.12	0.50
	PH	-0.99	0.29	0.06	-0.77	0.74	-0.88	-0.99

은 것을 알 수 있다. 대관령 지점과 북강릉 지점은 각 MI, mFFWI가 0.9 이상의 높은 상관성을 띠는 것으로 나타났다. 그러나 이외의 지수들은 대체로 음의 상관계수를 나타내며, 상관성이 낮은 것으로 확인할 수 있다. 다음, 경상북도의 경우도 이와 유사한 특징이 나타났다. 경주, 영덕, 포항 지점의 경우 러시아에서 개발된 NI, ZhI가 대체로 상관성이 높은 것으로 나타났다. 특히, 영덕 지점에 한정해서 NI는 0.99의 매우 높은 상관성이 나타난 것을 확인할 수 있다. 그러나 울진 지점에 대해서는 두 지수 모두 낮은 상관성이 나타났으며, 특히, 해당 지점에 대해선 사용된 모든 산불위험지수들이 저조한 상관성을 띠는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 산불 피해 면적에 대해 대부분의 산불위험 지수에서 낮은 상관성이 나타난 이유는 산불위험지수의 목적성에서 찾아볼 수 있다. 산불위험지수는 산불 발생의 정도를 나타내는 척도이지, 산불 피해 면적을 나타내는 척도는 아니기 때문이다. 따라서 산불위험지수를 이용하여 산불 피해 면적을 예측하기는 어려울 것으로 보인다.

4.3 산불위험지수의 한계와 보완 방향

본 연구에서 사용된 지수들은 여러 한계점을 가지고 있다. 국외에서 개발된 지수들은 모두 물리적인데, 이들의 구조는 궁극적으로 토양수분의 상태 또는 이에 따른 식생의 건조도를 간접적으로 간단히 추정할 수 있도록 되어 있다. 그러나 이들 지수는 당연히 개발된 지역의 기후 특성을 반영하고 있어 국내에 적용하는데 무리가 따를 수 밖에 없기도 하다. 구체적으로 살펴보면, 먼저, MI는 높은 극단성을 한계점으로 언급할 수 있다. MI의 경우, 무강우 지속기간만을 이용해 산불위험 정도를 판단한다. 즉, 강우 일수의 변동에 따라 지수의 수치가 변하는 것이다. 타 지수들의 경우 온도, 습도 등 여러 요소들이 고려되어 계산되기에 단일 요소의 변동에 대한 민감성이 높지 않다. 그러나 MI는 산불위험 정도 평가에 있어 단일 요소만 고려하기에 이에 대한 민감성이 높다. 따라서 강우 특성에 따라 극단성이 높은 형태로 나타난다.

KBDI의 경우, 국내 산불 발생 특성을 적절히 고려하지 못하는 한계가 있다. 국내에서 산불은 주로 건조한 기간에 발생한다. 그러나 KBDI는 오히려 여름철에 수치가 높게 나

타나 산불위험이 높은 것으로 나타난다. 이는 국내 산불 발생과는 상반된 결과이다. 이는 기본적으로 KBDI가 강수에 비해 온도의 영향을 주로 받는 지수이기 때문이다. FFWI의 경우는 계절별로 위험도 차이가 크지 않은 것이 한계점이다. 국내의 경우 산불 발생 건수를 비교하면 여름에 비해 봄에 약 2 ~ 20배 정도 차이가 나며, 동해안 지역의 경우 약 2 ~ 10배 정도 차이가 난다. 즉, 특정 계절별 편차가 큰 편이다. 그러나 FFWI는 계절별 추세가 나타나는 하지만 매우 미약하다. 이러한 특징은 mFFWI에서도 유사하게 나타나는 한계점이며, mFFWI가 FFWI를 보완한 지수이기 나타나는 당연한 특징이기도 하다. NI도 국내의 계절적 특성이 제대로 반영되지 않는다는 단점이 있다. 국내의 경우 앞서 언급했듯이 여름철에 산불 발생정도가 가장 낮다. 그러나 NI는 여름철 산불위험 정도가 겨울철 산불위험 정도에 비해 높은 것으로 예측하고 있다. 이는 MNI에서도 동일하게 나타나는 문제점이다. 두 지수가 동일한 문제점이 나타나는 이유는 물론 MNI가 NI를 기준으로 보완된 지수이기 때문이다.

ZhI는 전체적으로 가장 합리적인 구조를 가지고 있지만, 국내의 적용에서는 겨울철 산불위험을 제일 크게 또한 봄철의 산불위험을 그 다음으로 추정하는 문제를 보인다. 이는 기본적으로 겨울철 강설 특성을 적절히 고려하지 못하기 때문에 발생하는 것이다. 강설 특성을 고려하지 못하는 것은 사실 다른 지수들로 갖는 동일한 문제이다. 국내에는 겨울철에 강수가 강설의 형태로 내리는 경우가 많으며, 기온이 낮게 유지되는 겨울철에 눈이 오랫동안 지표를 덮게 되는 특성이 있다. 결과적으로 겨울의 강설은 토양수분을 증가시키고 또한 식생의 건조도를 완화시켜, 산불 발생을 억제하는 역할을 한다. 그러나 ZhI에서는 이러한 특성은 전혀 고려되지 않았다. 이로 인해 겨울철 산불위험 정도가 과도하게 추정되어 나타나는 것이다. 마지막으로 DWI는 다양한 기상인자를 독립변수로 하여 비선형 회귀분석을 통해 유도한 통계모형이다. 따라서 다른 지수들에 비해 대체로 나은 결과를 보인다. 그러나 이 지수도 특정지역에 대한 설명력이 크고 나머지 지역에서의 설명력이 낮아 보편성을 갖지 못하는 문제점이 있다. 봄철에 대체로 큰 산불위험을 제시하지만 3월에 높은 산불빈도를 설명하지 못하고, 오히려 5월의 산불위험을 가장 크게 제시하는 문제도 있다.

앞서 언급된 한계들로 인하여 본 연구에서 사용된 지수들은 현재의 산불위험 정도를 적절히 나타내기에는 한계가 뚜렷하다. 특히, 산불 발생이 가장 높은 봄철에 대한 예측을 제대로 나타내지 못하고 있다. 그러나 그 중 mFFWI, MI, Zhi, DWI 등이 실제 관측된 봄철 산불 발생을 가장 유사하게 나타내었다. 각 지수별 보완 방안으로는 우선, mFFWI는 계절별 변화를 부여할 수 있는 추가적인 매개변수를 더하는 방법이 가능할 것으로 보인다. 겨울, 여름의 산불위험은 낮게 추정하는 방식의 보완이 필요하다. MI의 경우 강수량 외에 산불위험을 나타낼 기상인자를 추가하는 형태로 보완이 가능할 것이다. Zhi는 강설에 대한 반응을 보완해야 한다. 즉, 겨울철의 산불위험을 봄이 되는 3월로 지연시킬 수 있는 보완이 필요하다. 마지막으로 DWI의 경우에도 특히 3월의 산불위험을 크게 할 수 있는 독립변수의 선택 및 매개변수의 결정 방법이 필요해 보인다. 좀 더 다양한 지점의 다양한 자료를 고려하여 현재의 한계를 극복할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 현재 가용한 국내외 산불위험지수들의 국내 적용성에 대해 평가하였다. 전 세계적으로 많이 사용되는 산불위험지수들을 먼저 소개하고 그 계산 과정을 소개하였다. 이를 통해 각 지수들의 특징을 분석하였다. 이후 실제 국내 산불 발생 건수의 경년 변동 및 계절적 변동 경향을 산불위험지수의 추세와 비교하였다. 이러한 비교를 통해 기존의 지수들 중 국내 산발을 가장 잘 대변할 수 있는 것이 무엇인지를 판단하였으며, 그렇지 못한 경우에는 그 원인이 무엇인지를 파악하였다. 또한, 향후 국내에 적용 가능한 지수들을 선정하여 그 적용성을 높일 수 있는 보완 방향에 대해서도 제시하였다. 본 연구는 산불의 발생이 빈번한 태백산맥의 동해안 지역을 대상으로 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

먼저, 산불위험지수를 이용해 동해안 지역의 산불위험을 계산한 결과 모든 지수에서 계절성이 나타났다. 대체로 1년을 주기로 지수의 등락이 반복되었으며, 겨울철 ~ 봄철을 기점으로 상승하여 여름철에 감소하는 형태로 나타났다. 그러나 KBDI의 경우 지수가 여름철에 대체로 높게 나타나며, 겨울철에 감소하는 형태로 나타났다. 즉, 국내 산불위험을 나타내기에 부적절한 것으로 나타났다. 이외에 대부분의 지수들이 최근으로 올수록 수치가 증가하는 형태를 보여주었다.

다음, 산불 발생 건수와 산불위험지수들의 추세를 비교 평가한 결과, 먼저, 산불위험지수들은 산불 발생의 연 평균 추세(경년변동)를 완만하게 따라가는 정도로 나타났다. 반대로, 월 평균 추세(계절변동)에서는 모든 지수들이 대체로 산불 발생 건수와 유사하게 나타났다. 그러나 일부 국외 산불위험지수들의 경우 겨울철 산불위험을 과도하게 추정하며, 실제 산불 발생과 유사하지 않은 특징도 보여주었다.

연 평균 추세와 관련해서는 NI, MNI, DWI의 상관계수가 높게 나타났으며, 월 평균 상관분석에서는 DWI, FFWI, mFFWI의 상관계수가 차례대로 높게 나타나며, DWI는 연 평균, 월 평균 모두 상관성이 높은 것으로 확인되었다.

추가로, 봄철을 대상으로 지점 별 상관분석을 수행한 결과 강원특별자치도에 위치한 강릉, 대관령, 북강릉 지점에서는 MI, Zhi, MNI, DWI의 상관성이 높은 것으로 나타났다. 경상북도에 위치한 경주, 영덕, 울진, 포항 지점에서는 주로 FFWI, mFFWI의 상관성이 높게 나타났다. 즉, 지점별로 높은 상관을 보이는 산불위험지수가 다른 것으로 나타났으며, 동해안 전 지역에 적용하기 적절한 지수는 없는 것으로 확인되었다. DWI의 경우 대관령 지역에 대한 대표성이 아주 컸으나, 반대로 나머지 지점에서는 매우 낮은 상관계수를 보였다. 또한, 산불 피해 면적에 대한 상관분석 결과 러시아에서 개발된 지수들이 상관성이 높게 나타났다. 그러나 이는 일부 지점에만 한정된 결과이며, 대체로 모든 지점에 상관성이 낮게 나타났다.

마지막으로 각 산불위험지수별 한계로 MI의 경우 높은 극단성, KBDI는 산불 발생 특성을 적절히 고려하지 못하는 것으로 나타났다. 또한, FFWI, mFFWI는 미약한 계절별 추세, NI, MNI는 상대적으로 높은 여름철 산불위험이 한계로 나타났으며, Zhi는 겨울철 높은 산불 위험, DWI는 봄철 낮은 상관성이 한계점으로 나타났다. 이들 지수들 중 추가의 보완을 통해 동해안 지역에 적용 가능한 것으로는 mFFWI, MI, Zhi, DWI 등이 있다. 그러나 각 지수별로 보완해야 할 부분이 달라, 보다 일반적인 지수 개발을 위해서는 각 지수의 보완 및 재평가가 다시 수행되어야 할 것으로 보인다.

사 사

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2021R1A5A1032433).

References

- Choi, J., Kim, S. J., Jung, H., Kim, S. Y. and Moon, G. S. (2022). "Projecting forest fire potential in the Baekdudaegan of the Chungcheong region under the SSP scenario climate change using KBDI Drought Index." *J. Korea Soc. Environ. Restor. Technol.* Vol. 25, No. 6, pp. 1-11.
- Dolling, K., Chu, P. S. and Fujioka, F. (2005). "A climatological study of the Keetch/Byram Drought Index and fire activity in the Hawaiian Islands." *Agric. For. Meteorol.* Vol. 133, No. 1-4, pp. 17-27.
- Eriksson, C. P. and Johansson, N. (2020). *Review of wildfire indices: Indices applicable for a swedish context.* Lund University, Lund, Swedish.

- Field, R. D., Wang, Y. and Roswintarti, O. (2004). "A drought-based predictor of recent haze events in western Indonesia." *Atmos. Environ.* Vol. 38, No. 13, pp. 1869–1878.
- Fosberg, M. A. (1978). *Weather in wildland fire management: the fire weather index*. US For Serv Reprints of articles by FS employees, Ogden, UT, USA.
- Geographic Area Coordination Center (GACC) (2020). *2020 National large incident year-to-date report*. National Interagency Fire Center, ID, USA, pp. 1–66.
- Goodrick, S. L. (2002). "Modification of the Fosberg fire weather index to include drought." *Int. J. Wildland Fire*, Vol. 11, No. 4, pp. 205–211.
- Groisman, P. Y., Sherstyukov, B. G., Razuvaev, V. N., Knight, R. W., Enloe, J. G., Stroumentova, N. S., Whitfield, P. H., Fø rland, E., Hannsen-Bauer, I., Tuomenvirta, H., Aleksandersson, H., Mescherskaya, A. V., Karl, T. R. (2007). "Potential forest fire danger over Northern Eurasia: changes during the 20th century." *Glob. planet. change*, Vol. 56 No. 3–4, pp. 371–386.
- Hamadeh, N., Karouni, A., Daya, B. and Chauvet, P. (2017). "Using correlative data analysis to develop weather index that estimates the risk of forest fires in Lebanon & Mediterranean: Assessment versus prevalent meteorological indices." *Case Stud. Fire Saf.* pp. 8–22.
- Heim Jr, R. R. (2002). "A review of twentieth-century drought indices used in the United States." *Bull. Am. Meteorol. Soc.* Vol. 83 No. 8, pp. 1149–1166.
- Keetch, J. J. and Byram, G. M. (1968). *A drought index for forest fire control (Vol. 38)*. US Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, NC, USA.
- Kim, Y. D., Gang, B. S., Hong, I. P. and No, H. J. (2011). *Building an integrated water quality management system for the Doam Dam*. Korea River Association, Seoul, Korea, pp. 85–91.
- Korea Forest Service (KFS) (2013). *2012 Statistical yearbook of forest fire*. Korea Forest Service, Seoul, Korea.
- Korea Forest Service (KFS) (2014). *2013 Statistical yearbook of forest fire*. Korea Forest Service, Seoul, Korea.
- Korea Forest Service (KFS) (2015). *2014 Statistical yearbook of forest fire*. Korea Forest Service, Seoul, Korea.
- Korea Forest Service (KFS) (2016). *2015 Statistics of forest*. Korea Forest Service, Seoul, Korea.
- Korea Forest Service (KFS) (2016). *2015 Statistical yearbook of forest fire*. Korea Forest Service, Seoul, Korea.
- Korea Forest Service (KFS) (2017). *2016 Statistical yearbook of forest fire*. Korea Forest Service, Seoul, Korea.
- Korea Forest Service (KFS) (2018). *2017 Statistical yearbook of forest fire*. Korea Forest Service, Seoul, Korea.
- Korea Forest Service (KFS) (2019). *2018 Statistical yearbook of forest fire*. Korea Forest Service, Seoul, Korea.
- Korea Forest Service (KFS) (2020). *2019 Statistical yearbook of forest fire*. Korea Forest Service, Seoul, Korea.
- Korea Forest Service (KFS) (2021). *2020 Statistical yearbook of forest fire*. Korea Forest Service, Seoul, Korea.
- Korea Forest Service (KFS) (2022). *2021 Statistical yearbook of forest fire*. Korea Forest Service, Seoul, Korea.
- Kwak, S., Bal, D. B., Lee, C. and Heo, W. (2013). *Long-term trends in summer water quality at Doam Reservoir*. Korean Journal of Ecology and Environment, Seoul, Korea.
- Lee, K., Lee, C. and Eu, S. (2022). "Temporal in land slide occurrences in post-fire areas over the past decades." *J. Korea Soc. Hazard Mitig.* Vol. 22, No. 4, pp. 47–55.
- Lee, S. Y. and Kim, J. E. (2011). "A Study on Meteorological Elements Effecting on Large-scale Forest Fire during Spring Time in Gangwon Young-dong Region." *J. Korea Soc. Hazard Mitig.* Vol. 11, No. 1, pp. 37–43.
- Lim, J. H. (2000). "Forest fire and meteorology of eastern Korea." *Korean J. Agric. For. Meteorol.* Vol. 2 No. 2, pp. 62–67.
- Luke, R. H. and McArthur, A. G. (1978). *Bushfires in Australia*. Australian Government Publishing Service for CSIRO, Canberra, Australia.
- Munger, T. T. (1916). "Graphic method of representing and comparing drought intensities." *Mon. Weather Rev.* Vol. 44, No. 11, pp. 642–643.
- National Institute of Forest Science (NIFoS) (2013). *A prediction of forest disaster change on climate change and establishment of counter-strategy*. National Institute of Forest Science, Seoul, Korea.
- National Institute of Forest Science (NIFoS) (2020). *Current state of forest fire management in Australia*. National Institute of Forest Science, Seoul, Korea.
- Nesterov, V. G. (1949). *Fire frequency index and method of its estimation*. Goslesbumaga, Moscow, Russia. (in Russian).
- Niu, R. and Zhai, P. (2012). "Study on forest fire danger over Northern China during the recent 50 years." *Clim. Chang.* 111, pp. 723–736.
- Ntinopoulos, N., Spiliotopoulos, M., Vasiliades, L. and Mylopoulos, N. (2022). "Contribution to the study of forest fires in Semi-Arid regions with the use of Canadian Fire Weather Index application in Greece." *Climate*, 10(10), 143.
- Ruffault, J., Martin-StPaul, N., Pimont, F. and Dupuy, J. L. (2018). "How well do meteorological drought indices predict live fuel moisture content (LFMC)? An assessment for wildfire research and operations in Mediterranean ecosystems." *Agric. For. Meteorol.* Vol. 262, pp. 391–401.
- Sharples, J. J., McRae, R. H., Weber, R. O. and Gill, A. M. (2009). "A simple index for assessing fire danger rating." *Environ. Model. Softw.* Vol. 24, No. 6, pp. 764–774.
- Sherstyukov, B. G. (2002). *Index of forest fire. yearbook of*

- weather, climate and ecology of Moscow*. Moscow State University, Moscow, Russia. pp. 83–84.
- Taufik, M., Setiawan, B. I. and Van Lanen, H. A. (2015). “Modification of a fire drought index for tropical wetland ecosystems by including water table depth.” *Agric. For. Meteorol.* Vol. 203, pp. 1–10.
- Van Wagner, C. E. (1987) *Development and structure of Canadian Forest Fire Weather Index System*. C.E. Canadian Forest Service, Ottawa, Canada.
- Varol, T. and Ertuğrul, M. (2016). “Analysis of the forest fires in the Antalya region of Turkey using the Keetch – Byram Drought Index.” *J. For. Res.* Vol. 27, pp. 811–819.
- Wang, Z., He, B., Chen, R. and Fan, C. (2023). “Improving wildfire danger assessment using time series features of weather and fuel in the great Xing’an Mountain Region, China.” *Forests*, Vol. 14, No. 5, pp. 986.
- Won, M., Jang, K. and Yoon, S. (2018). “Development of the national integrated Daily Weather Index (DWI) model to calculate forest fire danger rating in the spring and fall.” *Korean J. Agric. For. Meteorol.* Vol. 20, No. 4, pp. 348–356.
- Won, M. S., Lee, S. Y., Lee, M. B. and Ohga, S. (2010). “Development and application of a forest fire danger rating system in South Korea.” *J. Fac. Agr. Kyushu U.* Vol. 55, No. 2, pp. 221–229.
- Won, M., Yoon, S. and Jang, K. (2016). “Developing Korean forest fire occurrence probability model reflecting climate change in the spring of 2000s.” *Korean J. Agric. For. Meteorol.* Vol. 18, No. 4, pp. 199–207.
- Yang, Y., Uddstrom, M., Pearce, G. and Revell, M. (2015). “Reformulation of the drought code in the canadian fire weather index system implemented in New Zealand.” *J. Appl. Meteorol. Climatol.* Vol. 54, No. 7, pp. 1523–1537.
- Zhdanko, V. A. (1965). *Scientific basis of development of regional scales and their importance for forest fire management, Contemporary Problems of Forest Protection from Fire and Firefighting*. Moscow, Russia.
- Zigner, K., Carvalho, L. M., Jones, C. and Duine, G. J. (2022). “Extreme winds and fire weather in coastal Santa Barbara County, CA: An observational analysis.” *Int. J. Climatol.* Vol. 42, No. 1, pp. 597–618.